

## 대중교통카드기반 수도권 도시철도 통행수요배정모형

손지언\*

Sohn, Jhieon\*

### Development of Dynamic Passenger-Trip Assignment Model of Urban Railway Using Seoul-Incheon-Gyeonggi's Transportation Card

#### ABSTRACT

With approximately 20 million transportation card data entries of the metropolitan districts being generated per day, application of the data to management and policy interventions is becoming an issue of interest. The research herein attempts a model of the possibility of dynamic demand change predictions and its purpose is thereby to construct a Dynamic Passengers Trip Assignment Model. The model and algorithm created are targeted at city rail lines operated by seven different transport facilities with the exclusion of travel by bus, as passenger movements by this mode can be minutely disaggregated through card tagging. The model created has been constructed in continuous time as is fitting to the big data characteristic of transport card data, while passenger path choice behavior is effectively represented using a perception parameter as a function of increasing number of transfers. Running the model on 800 pairs of metropolitan city rail data has proven its capability in determining dynamic demand at any moment in time, in line with the typical advantages expected of a continuous time-based model. Comparison against data measured by the eye of existing rail operating facilities to assess changes in congestion intensity shows that the model closely approximates the values and trends of the existing data with high levels of confidence. Future research efforts should be directed toward continued examination into construction of an integrated bus-city rail system model.

**Key words** : Public transportation card, Dynamic, Trip assignment model, Big data, Seoul-incheon-yeonggi

#### 초 록

수도권에는 1일 약 2000만 건의 대중교통카드 전수자료가 생성되고 있으며, 이 자료를 이용하여 시설운영 및 정책방안을 개선하고 도출하려는 시도가 다양해지고 있다. 본 연구는 교통카드에서 생성되는 동적인 수요변화의 예측 가능성을 모형화하는 시도로서 동적 통행수요배정모형을 구축하는 것이 목적이다. 버스의 경우 승객 이동상황이 카드태그(tag)를 통해 비교적 정확하게 파악되므로, 본 연구에서는 버스를 제외한 수도권 도시철도에 대해, 7개 운송기관이 운영하는 노선을 대상으로 적용되는 모형 및 알고리즘을 구축하였다. 구축된 모형은 교통카드자료의 Big Data 속성에 적합하게 연속 시간형 모형으로 구축되었으며, 승객의 경로선택행태를 효과적으로 나타내기 위하여 환승 횟수 증가에 따른 인지파라메타를 구성하였다. 수도권 도시철도 약 800만 쌍에 대하여 모델링한 결과, 연속형 시간기반 모형의 장점이 반영되어 어떤 시간 시점에서도 동적 수요를 분석할 수 있는 특성을 파악하였다. 특히 기존 철도운영기관의 목적조사자료와 비교한 혼잡도 변화를 파악할 때, 모형에서 도출된 혼잡도와 운영기관이 제시한 혼잡도 간에 유사한 추세를 보이고 있어 높은 신뢰도를 보여주고 있다. 본 연구는 철도기관에 한정된 모형으로 향후, 버스-도시철도와 통합된 모형체계 구축과 같은 연구가 필요할 것으로 파악된다.

**검색어** : 대중교통카드, 동적, 수요배정모형, Big Data, 수도권

\* 정회원·교신저자·인천발전연구원 연구위원 (Corresponding Author·Incheon Development Institute·sohn21@idi.re.kr)

Received November 30, 2015/ revised December 1, 2015/ accepted December 17, 2015

# 1. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

수도권에는 약 2천만 건 이상의 대중교통카드 정보가 생성되며, 교통 분야를 포함한 다양한 분야에서 분석자료로서 활용도가 매우 높다. 교통카드에는 승객의 이용수단, 승차시간, 승차역, 하차시간, 하차역 등 핵심적으로 이용 가능한 기본 자료가 실시간 기록되고 있다. 또한 수단의 노선 자료와 연계하면 승객이 이용한 통행거리, 차량의 탑승인원과 같은 다양한 대중교통 통행지표 도출이 가능하다. 서울시와 인천시 및 경기도는 BMS, BIS와 같이 버스와 관련된 운영 및 정보체계 구축을 중심으로 대중교통카드 자료를 사용하고 있다.

지금까지 카드자료분석이 버스부문에 한정되었던 이유는 승객의 카드태그가 차량내부에서 발생하는 특성 때문이다. 버스에 승하차하면서 교통카드를 모두 단말기에 접촉(tag)해야하기 때문에 탑승하는 승객과 하차하는 승객의 개별통행에 대해서 비교적 정확히 모니터링이 가능하다. 따라서 노선망에 대한 전반적인 분석이 가능하고 버스-버스, 버스-철도간 환승에 대한 지점별, 구역별, 노선별 상황을 면밀히 파악할 수 있다. 또한, 승하차 정보를 활용하여 개별차량내부의 혼잡상황 등을 알 수 있는 상태정보 계산이 가능하다. 이에 따라 버스노선개편과 증차 등 다양한 버스정책에 활용이 가능한 정보가 도출될 수 있다.

그러나 수도권 도시철도의 경우는 차량별로 이용자를 파악할 수 있는 시설이나 장치가 부족하다. 열차내부가 아닌 철도역사에서

승하차태그가 이루어져 어떤 열차에서 승하차했는지 정확히 파악할 방법이 없다. 또한 현재 수도권 도시철도 7개 운영기관<sup>1)</sup>중 민자기관을 제외한 4개 기관에서 환승역에 환승게이트가 설치되어 있지 않아 승객의 환승행태를 정확하게 추적할 수 없다. 민자기관은 환승역에 환승게이트를 설치해서 환승경유지 정보를 생성하고 있으나, 승객이 집중되는 침두시 환승게이트를 중심으로 발생하는 통과 지체와 안전 문제로 환승게이트 철거에 대한 논의가 거론되고 있는 실정이다. 또한 타노선을 경유하는 환승 데이터는 영업실적과 밀접한 관계가 있어 데이터를 협조받는 것이 쉽지 않다. 따라서 환승게이트를 설치하지 않더라도 승객의 행태를 파악하는 대안의 강구가 필요한 상황이다. 일각에서는 환승역사통로를 활용하여 환승객 규모를 일일이 수작업으로 추산하는 방법을 모색하고 있지만 80여개가 넘는 수도권 철도환승역사에 대해 이러한 방법을 이용하여 환승객 규모를 파악하는 것은 거의 불가능한 방법이다. 또한 환승객과 승하차 이용객인지를 구별하는 것은 불가능하다. 따라서 모형에 의해 다양한 이용행태를 추산하고 검증하는 방법이 최선이라고 할 수 있다.

따라서 이 연구는 다양한 수도권 대중교통행태에 관한 실시간 분석을 위하여 대중교통카드자료를 활용한 동적 통행경로 모형을 제안한다. 이를 위해 카드자료에 포함되어 있는 개별승객의 출발역 개찰구와 태그시간, 도착역 개찰구를 기본정보로 하는 출발시간기반 통행경로구축모형을 구성한다. 여기서 개별승객은 자신의 일반 화통행비용을 최소화하기 위해서 경로를 선택한다는 기본가정을 활용하고 이를 최소화하는 수리적인 동적 통행배정모형(이하 동적

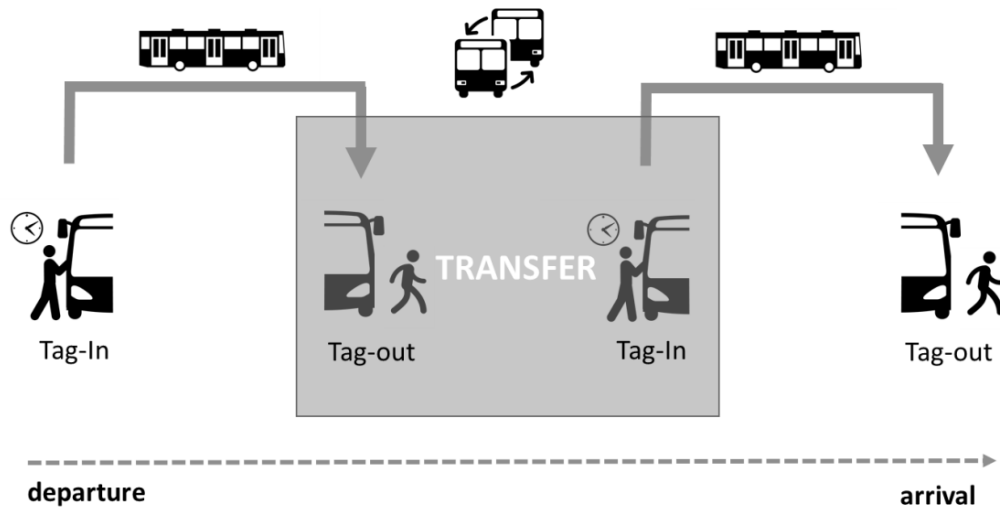


Fig. 1. Transfer between Buses

1) 2015년 현재는 9개운영기관으로 확대. 코레일, 서울메트로, 서울도시철도공사, 인천교통공사, 신분당선, 공항철도, 서울지하철9호선, 용인경전철, 의정부경전철 등

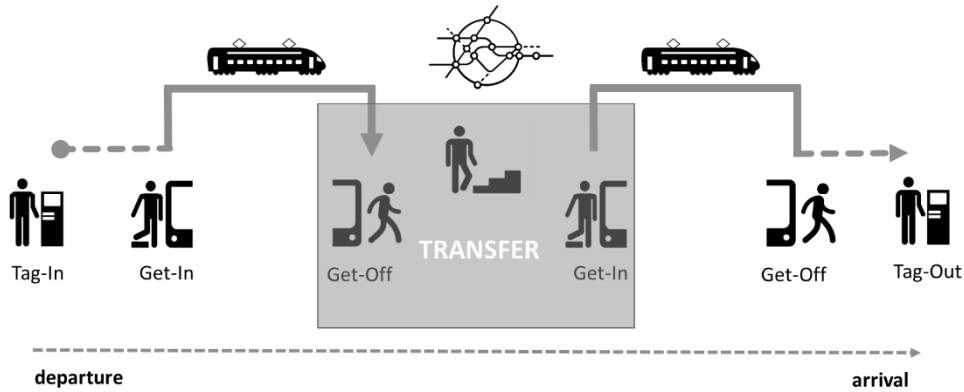


Fig. 2. Transfer between Subways

배정모형)을 구축한다. 현재 수도권 도시철도에서 발생하는 개인별 통행사슬은 1일 약 800만 건이므로 이들 통행사슬을 활용하여 시간대별로 수도권 도시철도의 노선-링크에 배정되는 모형이 구축 가능하다. 구축모형을 검증하기 위하여 분석의 공간적 범위를 전체 수도권 도시철도를 대상으로 수행하고 정책적 시사점을 도출한다.

이 연구는 다음과 같은 과정으로 수행되었다. 2장에서는 기존 연구에서 발표된 대중교통 통행배정모형을 통하여 본 모형에서 제시하는 모형구조와 비교하고 차이를 서술한다. 다음으로 3장에서 이 연구에서 제안하는 모형을 구체화하고 알고리즘을 구축한다. 4장에서 수도권 대중교통카드자료를 대상으로 모형에 적용하여 관련 분석을 수행하고 도출된 결과를 검토한다. 5장은 연구 결론과 추가적인 향후 연구과제에 대하여 논의한다.

## 2. 교통카드기반 동적 수요배정모형의 특징

### 2.1 기존 대중교통 통행배정모형

일반 개인승용차량은 출발지에서 도착지까지 환승이라는 경우의 수를 반영할 필요가 거의 없다. 그러나 대중교통으로 통행하는 경우 타 노선으로 환승하는 상황이 자주 발생한다. 따라서 대중교통을 이용하는 환승통행은 환승이동시간과 타 노선탑승을 위한 대기 시간을 추가적인 비용 요소로 반영해야 한다.

대중교통통행배정모형은 크게 세가지 모형-1) 전량통행배정모형, 2) 최적전략(optimal strategy)에 의한 통행배정모형, 3) 경로기반 통행배정모형-으로 발전되어 왔다. 전량통행배정모형은 기종점 정류장간 대기시간 및 다른 노선으로 환승을 고려하여 최단경로를 찾고 그 경로에 수요를 전량으로 배정하는 방법이다. 이 기법은 기종점간 경로를 연결하는 경로의 수가 적고 수요가 많지 않은 경우 합리적이거나 수도권과 같은 대규모 교통망에서 적용하기는 곤란하다.

최적전략에 의한 통행배정모형은 대중교통 통행배정모형에서

대표적으로 많이 알려져 있으며 Spiess and Florian (1989)에 의해 개발되었다. 특히 우리나라에서 대부분 이용하는 교통계획 패키지인 EMME/4에 기본적인 대중교통배정모형으로 내장되어 있어 가장 많이 활용되고 있다. 최적전략 모형의 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{a \in A} c_a \cdot v_a + \sum_{i \in I} \omega_i \\ \text{s.t.} & \sum_{a \in A_i^+} v_a - \sum_{a \in A_i^-} v_a = g_i, i \in I \\ & v_a \leq f_a \cdot \omega_i, a \in A_i^+, i \in I \\ & v_a \geq 0, a \in A \end{aligned}$$

- 여기서,  $A = \{a\}$  링크집합
- $I = \{i\}$  노드집합
- $A_i^+$  노드를 나가는 링크집합
- $A_i^-$  노드를 들어가는 링크집합
- $g_i$  노드에서 목적지로의 통행수요
- $v_a$  링크a의 통행량
- $v_i$  노드의 통행량
- $c_a$  링크a의 통행비용
- $f_a$  링크a의 운행횟수
- $\omega_i$  노드에서의 총대기시간

최적전략에서 전략(strategy)은 대중교통이용자가 출발지에서 도착지까지 이용할 수 있는 다양한 경로선택방법에 대한 모든 경우의 수라고 할 수 있다. 최적전략 모형은 승객이 최적전략에

포함되는 노선 중에서 가장 먼저 오는 노선에 승차한다고 가정하여 운행횟수에 비례하여 노드 통행량을 링크에 배분한다. 이 방법은 정류장 측면에서는 승객의 행태를 비교적 합리적으로 반영하나, 기종점간 통행시간이 크더라도 배치간격이 작을 경우 통행시간이 짧은 노선보다 많은 통행량이 배정되는 비 현실적인 상황이 발생하는 단점이 존재한다.

경로기반 통행배정모형은 출발지와 도착지를 연결하는 이용 가능한 복수의 경로를 검토하여 수요를 배정하는 방법이다. 복수의 경로는 승객이 최적경로와 유사한 경로로 인식하는 경로를 의미한다. 따라서 복수의 경로는 유사경로를 의미하며 이 경로는 이미 선택 가능성을 내포하고 있으므로 확실적인 통행배정모형에 속한다고 볼 수 있다. 탐색된 경로를 바탕으로 와이불분포(Wei-bull)를 가정한 로짓모형에 의한 확률로 배정수요량을 파악할 수 있다. 그러나 유사경로에 포함되면 최적경로로 인식한다는 의미에서 균일확률(Uniform probability)에 의한 통행배정도 가능하다.

### 2.2 동적 통행배정모형

동적 통행배정모형은 일반 승용차량에 대하여 시간대 별로 변화하는 수요를 고려하여 통행을 배정하기 위해 제안되었다. 실시간으로 교통상황을 파악하고 해결할 수 있는 시간종속적(time dependent)인 모형으로 시뮬레이션 기법과 수학적 기법을 통합하여 발달되었다. 동적 통행배정모형에서 통행자를 교통망에 합리적으로 배정하기 위한 경로선택규칙은 정적 통행배정모형의 Wardrop의 이용자 균형개념을 활용하였다. 이를 동적 이용자 균형상태라고 정의하며 다음과 같다.

- 동적 이용자균형상태란 기점에서 각 시간대에 출발하는 모든 통행자들이 종점에 도착할 때까지 실제 경험한 통행시간이 모두 같고, 그 값은 최소통행시간을 의미한다.

수리적인 기법을 포함하는 동적 통행배정은 크게 3가지 모형- 1) 수리최적화 모형, 2) 최적제어모형, 3) 변동부등식 모형-으로 구분된다.

수리최적화모형(Mathematical Programming Model)은 Merchant and Nemhauser (1978a, b)에 의해 이산형 비볼록(Non convex)의 형태로서 체계 최적화문제로 구성되었다. Carey (1986)은 Merchant and Nemhauser 모형을 볼록(Convex) 문제로 재구성하였다.

최적제어모형(Optimal Control Model)은 Friesz et al. (1989), Wie et al. (1990), Lam and Huang (1995)에 의해 연구되었다. 통행배정을 연속시간 최적제어 문제로 구성하여 Pontryagin (1962)의 최대원칙(maximum principle)을 이용하여 최적성 조건을 유도하였다.

변동부등식모형(Variational Inequality Model)은 Friesz et al. (1993)가 출발시간선택을 고려한 동적 사용자 균형 개념을 도입하기 위하여 제안되었다. Wie et al. (1995)은 동적통행배정문제를 이산시간(Discrete Time) 변동부등식으로 동적통행배정문제를 구성하였다. Ran (1996)은 링크기반 변동부등식 모형을 개발하였다.

아래 식은 Ran (1996)이 실제 경험한 통행시간을 기반으로 동적 사용자 균형으로 제안한 경로기반의 변동부등식이다. 이 식은 연속형 시간으로 표현된 식이다.

$$\int_0^T \sum_r \sum_s \sum_p \pi_p^{rs}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs}(t)^*] dt \geq 0$$

여기서,  $\pi_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간에 출발한 차량이 경로 p를 이용해 s에 도달하는 실제 통행시간  
 $f_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간 경로 p를 이용해 s에 도달한 교통량  
 $f_p^{rs}(t)^*$   $f_p^{rs}(t)$ 의 최적해

연속형 시간으로 표현된 위의 식을 이산형 시간으로 변환하면 다음과 같은 변동부등식이 도출된다. 아래 식은 수요를 배정하기 위해 시간대별로 조성된 수요를 실제 컴퓨터 연산을 통해 계산하기 위하여 적용되고 있다.

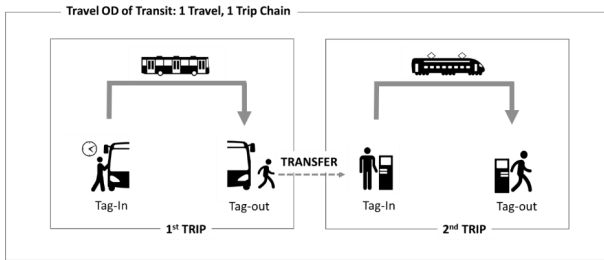
$$\sum_t \sum_r \sum_s \sum_p \pi_p^{rs}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs}(t)^*] \geq 0$$

### 2.3 교통카드기반 대중교통 수요배정모형의 특징

2.1절과 2.2절을 통해 기존의 대중교통 통행배정모형과 동적 통행배정모형의 구조를 파악하였다. 본 연구는 교통카드를 기반으로 동적인 수요를 배정하는 것이므로 이미 제안된 두 모형구조와 차이점을 논의하고 새로운 모형으로 개발되는 의의를 파악할 필요가 있다.

수도권 교통카드를 기반으로 하는 모형관련 특성 중 첫 번째는 기종점을 연결하는 경로기반 모형이 필요하다는 것이다. 본 연구의 범위는 도시철도에 한정되어 있으나 수도권 환승할인 요금정책을 운영하는 교통카드 정보는 최대 5회(환승4회) 수단이 포함되는 여행(travel; trip-chain)구조로 구축되어 있다. 여기서 여행은 개별 수단을 이용하는 통행(mode trip)의 합으로 표현된다. 버스통행은 전술한 바와 같이 태그(tag-in, tag-out)가 각각의 차량 내에서 발생하므로 노선경로를 파악할 수 있으나 도시철도 관련 환승 통행은 경로를 모형으로 구축하는 과정이 필요하다. 통행배정모형 체계에서 완성된 이용경로 구조는 이미 확정된 버스경로와 모형에

서 도출되는 도시철도 통행경로를 결합하는 과정에서 이해하는 것이 필요하다. 이는 본 연구에서 구축된 수도권 도시철도 통행배정 모형이 경로기반 모형이기 때문이다.



주: 태그인(tag-In), 태그아웃(tag-Out)은 승하차시 교통카드를 단말기에 접촉하는 행위

Fig. 3. Concepts of Travel and Trip

두 번째로 교통카드 태그는 대중교통노선이 운행되는 거의 24시간 실시간으로 이루어지기 때문에 연속형 시간 모형으로 구축하는 것이 필요하다. 기존에 제안된 모형의 초기 구조는 Ran (1996)과 같이 수리적으로 이해가 쉬운 연속시간 모형으로 제안되었으나, 수요가 기점을 출발하는 시간의 불확실성으로 인해서 이산시간에 통행수요를 균집해서 적용하는 이산형 모형으로 수행되었다. 만약 개인이 교통카드를 태그하는 상황을 모두 반영해야 한다면 궁극적으로 개인의 통행을 카드가 태그되는 모든 연속적인 시간구조로 파악하는 것이 필요하다. 아래 그림은 출발역사 r의 개찰구를 8시 20분 12초에 통과하는 상황을 묘사하고 있다. 기존 모형에서는 5분 또는 10분 단위의 수요를 판단하여 균집수요를 배정하는 방법을 일반적으로 적용하고 있으나, 교통카드는 개별 통행자에 대하여 태그가 발생하는 모든 시간을 반영하는 방안이 요구된다. 이를 위해 본 연구는 출발지 기반의 연속시간형 동적 모형으로 구축하였다.



Fig. 4. Time Continuity by Personal Trip

마지막으로 동적 통행시간의 결정에 대한 문제이다. 기존 연구에서 동적 모형이 적용하는 동적 통행시간은 실제통행시간(actual time)과 동시통행시간(instantaneous time)으로 구분된다. 실제통행시간은 교통망에서 시간대별로 발생하는 모든 혼잡상황을 고려하여 실제여행자가 경험한 통행시간을 의미한다. 동시통행시간은

출발지에서 출발하는 시점을 기준으로 목적지까지 통행하는 시간을 의미한다. 이론적으로 볼 때 동시통행시간은 시점에서 결정된 혼잡을 나타내는 것이므로, 교통망의 미래 상황을 정확하게 예측한다고 볼 수 없다. 따라서 기존에 제안된 연구 모형은 Ran (1996)과 같이 모형을 통해 사전적으로 예측되는 실제통행시간을 통해서 통행량이 배정된다.

교통카드의 경우 출발역-개찰구를 태그하는 시간과 도착역-개찰구를 태그하는 시간이 실시간으로 생성되며, 이 두 시간의 차이가 실제여행시간으로 파악된다. Fig. 5에서 나타나듯이 출발역과 도착역 게이트의 태그시간 차이는 1시간 2분 6초이며 이는 승객이 실제로 경험한 통행시간이다. 이처럼 교통카드에서 도출되는 통행시간은 사후적인 상황이 드러난 현실이며, 이 사실을 통해서 교통상황을 역으로 예측하는 상황이 요구될 수 있다. 따라서 본 연구모형은 기존 모형과는 달리 사후적 모형구조를 나타낸다고 할 수 있다.



Fig. 5. Card Tag Time Information

### 3. 수도권 도시철도 동적 통행수요배정모형

#### 3.1 모형

수도권 도시철도 교통카드의 하루 통행사슬은 약 800만 개에 이른다. 출발단위로 파악할 때 약 800만개의 개별적인 t시간을 포함하는 것이다. 물론 엄밀하게 말하면 800만개의 이산시간에 기반한 모형이라고 할 수 있으나, 태그하는 승객과 시간대를 모두 포함하는 측면에서 폐쇄된 수도권 도시철도 시스템의 연속형 모형 구조로 구축하는 것이 타당하다. 따라서 본 연구에서 제안하는 모형은 경로기반 연속형 동적 통행배정모형이다.

이 모형의 식은 아래와 같다. 우선 목적함수는 통행자가 일반화 비용을 최소화하는 통행경로를 선택하는 것을 의미한다. 제약조건은 1인 통행자가 선택 가능한 경로에 1인을 확률적으로 배정하는 것을 의미한다. 따라서 엄밀한 의미에서 이 모형은 경로기반 확률적 연속형 통행배정모형이다. 그러나 기종점간에 사용된 경로를 최적 경로와 분간하기 어려운 유사한 경로라고 가정하고, 본 모형은 이 유사경로에 균일한 확률을 적용한다. 참고로 수도권도시철도운 영기관(2012)에서 유사경로에 대한 판정기준을 최적경로 일반화 비용의 10% 이내를 유사경로라고 판정하고 최대 3개의 경로까지 탐색하였다. 이 탐색경로에서 각 경로의 수요배정 확률을 0.7, 0.2, 0.1로 합의한 사례가 존재한다.

$$\min \int_0^T \sum_r \sum_s \sum_p \xi_p^{rs}(t) \cdot f_p^{rs}(t) dt$$

$$s.t. \sum_p f_p^{rs}(t) = 1$$

$$f_p^{rs}(t) \geq 0$$

$$x_a(t) = f_0^T \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,a}^{rs}(t) dt$$

여기서,  $\xi_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간에 출발한 승객이 경로 p를 이용해 s에 도달하는 일반화 통행비용으로서 환산된 통행시간(분)

$f_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간 경로 p를 이용해 s에 도달한 수요(인)

$x_a(t)$  수단-링크 a에 t시간에 통과하는 수요(인)

$\delta_{p,a}^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간에 출발한 경로 p에 링크 a가 속하면: 1  
그렇지 않으면: 0

위의 식에서 특정 시간대에 b링크를 통과하는 수요는 다음과 같이 표현된다.

$$x_b(tt) = \int_0^T \sum_r \sum_s \sum_p f_p^{rs}(t) \cdot \delta_{p,b}^{rs}(tt) dt$$

여기서,  $\delta_{p,b}^{rs}(tt)$  경로 p에 링크 b가 속하면서 t시간이 tt시간대에 포함되면: 1  
그렇지 않으면: 0

### 3.2 일반화비용

본 연구 제안 모형에서 경로를 탐색하는 기준은 시간으로 환산된 일반화비용이다. 탑승역-하차역-게이트에서 태그할 때까지 1번 환승을 하는 경우를 가정으로 일반화비용 요소를 파악하고자 한다. Fig. 6은 이러한 과정을 나타내며 출발 r에서 도착 s에 태그하는 상황을 표현하고 있다. 여기서 통행시간에 포함되는 상황은 크게 5가지로 구분된다.

- 탑승이동시간(①): 탑승역 태그 후 열차를 타기위해 이동하는 시간(분)
- 열차대기시간(②): 열차가 올 때까지 대기하는 시간 (열차차두 간격\*0.5, 분)

- 차내이동시간(③): 열차탑승 후 이동시간(분)
- 환승이동시간(④): 열차하차 후 환승열차를 탑승하기 위해서 이동(분)
- 출구이동시간(⑤): 열차하차 후 출구역 태그까지 이동시간(분)

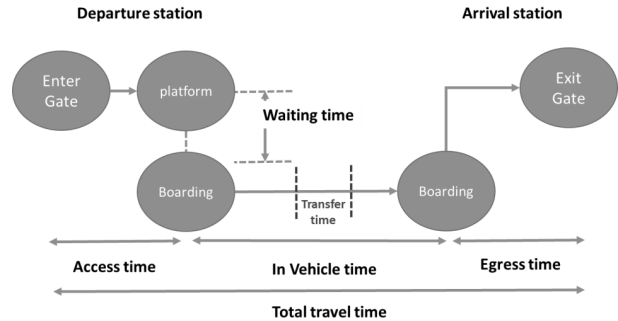


Fig. 6. Total Travel Time for Trip-chain

본 연구에서 적용하는 일반화비용은 환승횟수에 비례해서 환승 인지비용(transfer perceived cost)이 증가하는 형태로 제안한다. 이 식은 아래와 같이 표현된다. Fig. 7은 환승횟수 증가에 따라 계단형 증가형태를 보이는 함수로 설정되어 있다. 이 식은 따라서 환승이동시간과 환승대기시간이 환승횟수가 증가함에 따라 큰 비중으로 증가하는 형태이다. 동일한 환승시간이라도 환승횟수가 많으면 더욱 높은 통행비용을 고려하는 형태를 나타내는 것이다. 이는 승객이 통행시간은 더 소요되더라도 환승횟수가 적은 경로를 선택하는 행태를 효과적으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_p^{rs}(t) = lvt_p^{rs}(t) + \sum_{n=0}^N \alpha_p^n \cdot (M_p^{rs}(t) + W_p^{rs}(t)) + \beta$$

여기서,  $lvt_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간에 출발한 승객이 경로 p를 이용해 s에 도달하는 일반화 통행비용으로서 환산된 통행시간(분)

$\xi_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간 경로 p를 이용해 s에 도달한 차내시간(③)

$M_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간 경로 p를 이용해 s에 도달한 환승이동시간(④①)

$W_p^{rs}(t)$  r-s 간 r을 t시간 경로 p를 이용해 s에 도달한 열차대기시간(②)

$\beta$  하차이동시간(⑤)=1.0분

$\alpha_p^n$  환승횟수(n)에 따라 Step-wise 형태로 증가하는 환승파라메타

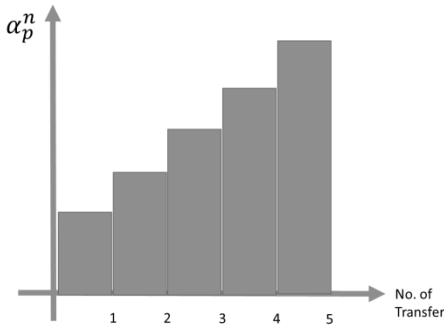


Fig. 7. Transit Coefficient According to the Number of Transfer

### 3.3 알고리즘

본 연구에서 제안한 모형을 프로그램에서 운영하기 위해서는 모든 교통카드 자료에 대하여 Fig. 8과 같은 알고리즘 수행이 필요하다. 승객의 출발지, 도착지, 출발시간 정보는 교통카드자료를 통해서 생성되며, 별도의 도시철도 네트워크를 초기상태로 준비한다. 출발지와 도착지를 연결하는 동적 유사경로를 탐색하기 위하여 Avezedo et al. (1993)이 제안한 K경로탐색알고리즘을 이용한다. 이 알고리즘에서 탐색된 최초의 동적경로를 기준으로 네트워크를 변형하면서 계속 다음 경로를 탐색하는 과정을 반복한다. 이때 탐색된 경로가 최초로 탐색된 경로의 일반화비용과 비교하여 어느 정도 오차범위를 벗어나면, 이 경로를 제외한 나머지 경로를 유사경로로 확정한다. 유사경로에 배정되는 수요량은 모두 개별통행이므로 1을 탐색된 유사경로수로 나누면 균등배정확률이 되며, 이 배정확률이 유사경로에 배정된 동적 통행수요가 된다.

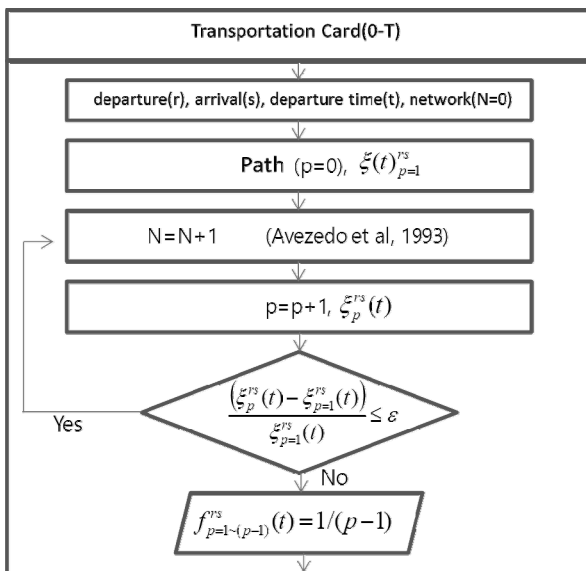


Fig. 8. Algorithm for Dynamic Passenger Trip Assignment Based on Transportation Card

### 3.4 동적 경로 탐색

출발지(r)에서 시간t를 시점으로 경로를 탐색하는 방안은 링크 반 최적식을 구축한다. 여기서 동적최적 경로식은 다음과 같다.

$$\xi_b^r(t) = \min \left( \xi_a^r(t) + \alpha_{rb}^n \cdot \left( W_{ab} + \frac{H_b}{2} \right) + C_b(t + \pi_a^r(t) + W_{ab} + \frac{H_b}{2}), \xi_b^r(t) \right)$$

- 여기서,  $C_b$     b링크의 t시간대 통행시간
- $\xi_b^r(t)$     r에서 t시점에 출발해서 링크b의 끝지점까지 최적일반화비용
- $\pi_a^r(t)$     r에서 t시점에 출발해서 링크a의 끝지점까지 통행시간
- $W_{ab}$     링크 a에서 링크b로 환승시간
- $H_b$     링크b의 차두간격
- $\alpha_{rb}^n$     출발지 r에서 링크b의 도착지점까지 환승횟수에 따른 환승계수

## 4. 사례연구 및 분석

### 4.1 자료

교통카드자료는 2011년과 2013년 각각 일일 자료를 활용하였다. 적용된 네트워크는 578개 카드자료기반 노드로 구성된 자료를 실제 역노드로 환산하는 과정을 거쳤으며, 역간 링크수는 1,125개로 구성되었다. 환승역의 방향별 환승이동시간 및 환승대기시간은 수도권 7개 도시철도운영기관에서 2012년 조사한 자료를 적용하였다.

### 4.2 모형적합도

모형에서 도출된 통행시간과 실제교통카드에서 도출된 통행시간을 비교하기 위하여 선형회귀식을 구성하였다. Fig. 9는 모형에서 추정된 통행시간과 실제교통카드에서 추출한 통행시간을 비교하는 선형회귀식을 보여주는데 결정계수  $R^2 = 0.94$  정도의 높은 일치성을 보여주고 있다. 따라서 모형의 적합도는 매우 높다고 판단할 수 있다.

### 4.3 결과분석

본 연구에서 제안한 동적 모형의 추정력을 분석하기 위하여 인천도시철도1호선에서 가장 수요가 많은 구간인 부평시장역에서 부평역까지의 시간대별 이동수요를 5분, 15분간격으로 비교하였다. 5분이하 및 15분이상의 임의의 시간간격대에서도 분석을 수행

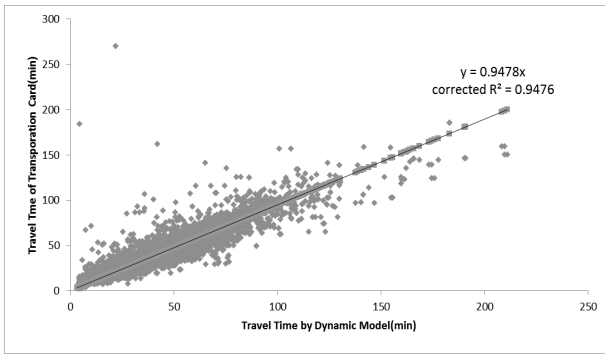


Fig. 9. Comparison of Travel Time between Transportation Card and Proposed Model

Table 1. Dynamic Trip Demand from Bupyeong Market Station to Bupyeong Station (trip/15 min : 2013)

Hour	Minute				Sum
	0-15	16-30	30-45	46-60	
1	31	60	36.5	6.5	134
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	12	204.5	379.5	367	963
7	516	691.5	1031.5	1562	3801
8	2051.5	2624	2914	3059	10648.5
9	2980.5	2802	2148.5	1589.5	9520.5
10	1473.5	1360	1071	802	4706.5
11	781	681.5	728	603.5	2794
12	601	661	670	645	2577
13	639	729.5	674	590.5	2633
14	679.5	726.5	626	607	2639
15	552	607	545	561.5	2265.5
16	709.5	686	649.5	604	2649
17	644.5	791	697.5	734.5	2867.5
18	914.5	979	1064.5	1183.5	4141.5
19	1440.5	1700	1571.5	1460.5	6172.5
20	1366.5	1224	976	848	4414.5
21	729.5	687.5	733	644.5	2794.5
22	664.5	719	636	558.5	2578
23	567.5	534.5	443	399	1944
24	366	307.5	266.5	201	1141
25	127	45	11	3	186
26	31	60	36.5	6.5	0

Table 2. Dynamic Trip Demand from Bupyeong Market Station to Bupyeong Station (trip/15 min : 2011)

Hour	Minute				sum
	0-15	16-30	30-45	46-60	
1	39.0	74.0	40.0	9.0	162.0
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	9.5	145.5	306.0	283.5	744.5
7	361.5	499.5	706.5	1,140.0	2,707.5
8	1,626.0	2,137.5	2,570.0	2,487.0	8,820.5
9	2,407.5	2,419.5	1,993.0	1,676.5	8,496.5
10	1,693.0	1,297.5	927.0	777.0	4,694.5
11	619.0	591.0	545.0	506.5	2,261.5
12	495.5	518.5	542.5	578.0	2,134.5
13	607.5	570.5	593.5	579.0	2,350.5
14	602.0	657.5	490.0	504.5	2,254.0
15	550.5	542.5	477.5	508.5	2,079.0
16	506.5	495.0	607.0	591.0	2,199.5
17	642.0	652.0	781.5	875.0	2,950.5
18	900.5	1,025.0	977.5	1,129.0	4,032.0
19	1,370.5	1,529.0	1,441.5	1,418.5	5,759.5
20	1,372.5	1,173.0	1,022.0	824.0	4,391.5
21	676.0	658.5	602.5	563.0	2,500.0
22	657.5	576.5	495.5	439.0	2,168.5
23	476.0	478.0	382.5	392.0	1,728.5
24	356.0	297.0	284.0	186.5	1,123.5
25	123.5	43.0	10.5	0.5	177.5
26	-	-	-	-	-

할 수 있으나, 대표적인 분석단위인 5분과 15분단위를 이용하여 모형의 추정력을 살펴보았다. 또한 연도별 비교를 위하여 2011년과 2013년 자료를 활용하였으며 2011년 자료는 시간간격을 5분 및 15분간 분석을 각각 수행하였다. Tables 1, 2 and 3은 1시부터 24시까지 전일 통행수요를 보여주고 있으며, 1시간을 15분과 5분 단위로 구분하여 부평시장역과 부평역 해당 시간대에 그 구간을 이용한 통행수요를 표시하였다. 24시 이후 통행수요는 이전일에 종료되지 못한 통행이 남아있다는 의미이다. 위의 결과를 Figs. 10 and 11과 같이 15분 및 5분단위의 수요변화로 표시하고 1시간 기준으로 총합하여 동적으로 변화하는 수요변화를 나타내었다. 이는 도심지 통행에서 일반적으로 나타나는 통행분포패턴인 오전, 오후 첨두 쌍봉 형태임을 보여주고 있다.



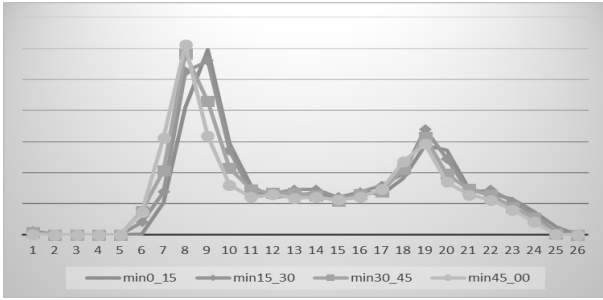


Fig. 10. Comparison of Dynamic Demand (15min.: from Bupyeong Market Stn. to Bupyeong Stn. 2011)

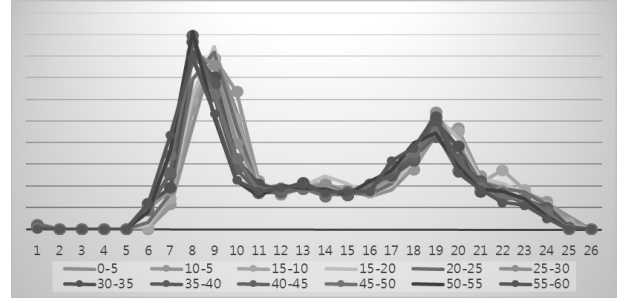


Fig. 11. Comparison of Dynamic Demand (5min.: from Bupyeong Market Stn. to Bupyeong Stn. 2011)

Table 3. Dynamic Trip Demand from Bupyeong Market Station to Bupyeong Station (trip/5 min : 2011)

Hour	Minute												Sum
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	
1	3	16	20	28	24	22	16	12	12	7	1	1	162
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	7.5	19.5	30.5	95.5	118.5	100	87.5	91	77.5	115	744.5
7	106	115.5	140	159.5	161.5	178.5	191	252.5	263	342.5	362	435.5	2707.5
8	475	555.5	595.5	624	693.5	820	804.5	868.5	897	779.5	914	793.5	8820.5
9	830	791	786.5	843	817.5	759	705.5	673	614.5	625	516.5	535	8496.5
10	545.5	636	511.5	423.5	476.5	397.5	324.5	324.5	278	327.5	222	227.5	4694.5
11	179.5	224	215.5	209	183	199	208.5	169.5	167	177	153.5	176	2261.5
12	166.5	162	167	153.5	203.5	161.5	184	189.5	169	190.5	199.5	188	2134.5
13	202	189	216.5	198.5	185	187	216	191	186.5	186.5	187.5	205	2350.5
14	180	214.5	207.5	245	208.5	204	165.5	163	161.5	151	185	168.5	2254
15	196.5	169	185	211	170	161.5	158	161	158.5	175.5	159	174	2079
16	150	186	170.5	157.5	157.5	180	192.5	209.5	205	199.5	219.5	172	2199.5
17	181.5	217	243.5	200	210	242	260.5	245.5	275.5	289	269.5	316.5	2950.5
18	287.5	274.5	338.5	315	369.5	340.5	327.5	316	334	354.5	398	376.5	4032
19	430	454.5	486	525.5	461.5	542	497	518	426.5	451	442.5	525	5759.5
20	454	467.5	451	422.5	388	362.5	384	322.5	315.5	270	294	260	4391.5
21	220.5	245.5	210	237	218	203.5	172	223.5	207	193	185.5	184.5	2500
22	192.5	191	274	209.5	188	179	167	162	166.5	140	176.5	122.5	2168.5
23	124	170.5	181.5	167	172.5	138.5	128.5	136.5	117.5	141.5	141	109.5	1728.5
24	119.5	128	108.5	97.5	111.5	88	100.5	98	85.5	77.5	59	50	1123.5
25	61	33.5	29	20	15	8	7.5	1	2	0	0.5	0	177.5
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 5. 결론

본 연구는 수도권에서 운영되는 대중교통카드자료를 이용하여 수도권 도시철도의 동적수요변화를 평가하기 위한 모형과 해법을

제안했다. 교통카드의 모형구조상 기존 프로그램에 적용되었던 이산형 시간 모형구조를 탈피하고 연속형 모형구조를 도입하는 방안을 강구하였다. 연속형 모형은 수도권 교통카드자료의 시간속성을 그대로 반영할 수 있어 빅데이터 기반의 모형구조로서 적합함

을 입증하였다. 특히 모형은 유사경로기반의 동적모형으로 구성했으며, 유사경로의 특성상 이미 승객의 확률적 선택이 포함된다는 특성을 반영하여 균일분포를 가정한 수요배정기법을 적용하였다.

약 800만 수요 쌍에 대한 수도권 도시철도의 사례수행은 매우 높은 신뢰도를 보여주었다. 이는 수도권 도시철도의 경로선택에 있어서 모형과 일반 승객의 유사성을 입증하는 것으로 이해할 수 있다. 또한 일반적으로 운영기관은 목적 및 중량조사를 통해서 혼잡도를 산정하고 있으며, 본 모형에서는 그러한 조사와 총량적인 측면에서 혼잡도의 경향이 매우 유사한 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구는 예측모형뿐만 아니라 동적 스케줄링과 같은 전략모형으로서 높은 가능성을 보여주었다.

이 연구는 수도권 도시철도를 대상으로 하는 모형구조였으나, 버스철도를 아우르는 대중교통망에 적용되어 장래 수도권 통합대중교통체계의 효율성 증진을 위한 향후 과제가 수행될 필요가 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 모형은 급행을 이용하는 승객행태에 대한 고려가 없기 때문에 향후 경인선과 서울지하철 9호선과 같이 급행철도에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## References

- Azevedo, J. A., Costa, M. E. O. S., Madeira, J. J. E. R. S. and Martins, E. Q. V. (1993). "An algorithm for the ranking of shortest paths." *European Journal of Operational Research*, Vol. 69, No. 1, pp. 97-106.
- Carey, M. (1992) Nonconvexity of the Dynamic Traffic Assignment Problem. *Transportation Research*. 26B, pp. 127-133.
- Friesz, T. L., Bernstein, D., Smith, T. E., Tobin, R. L. and Wie, B. W. (1993). A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Network User Equilibrium Problem. *Operations Research*. 41, pp. 179-191.
- Friesz, T. L., Luque, F. J., Tobin, R. L. and Wie, B. W. (1989). Dynamic Network Traffic Assignment Considered As A Continuous Time Optimal Control Problem. *Operations Research*. 37, pp. 893-901.
- Metchang, D. K. and Nemhausser, G. L. (1978a). A Model and An Algorithm for the Dynamic Traffic Assignment Problems. *Transportation Science*. 12, pp. 183-199.
- Metchang, D. K. and Nemhausser, G. L. (1978b). Optimality Conditions for a dynamic Traffic assignment Model. *Transportation Science*. 12, pp. 200-207.
- Pontryagin, L. S., Boltyanskii, V. G., Gamkrelidze, R. V. and Mishchenko, E. F. (1962). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. English translation. Interscience. ISBN 2-88124-077-1.
- Ran, B. and Boyce, D. E. (1996). *Modeling Dynamic Transportation Networks*. Springer.
- Spiess, H. and Florian, M. (1999). "Optimal Strategies : A New Assignment Model for Transit Networks." *Transportation Research B*, Vol. 3, No. 2, pp. 83-102.
- Wie, B. W., Friesz, T. L. and Tobin, R. L. (1990). "Dynamic user optimal traffic assignment on congested multidestination Networks." *Transportation Research*, 24B, pp. 443-451.
- Wie, B. W., Tobin, R. L., Friesz, T. L. and Bernstein, D. (1995). "A discrete time, Nested cost operator approach to the dynamic network user equilibrium problem." *Transportation Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 79-92.